

GDK / FDC: 812:827.1(045)=163.6

Prispelo / Received: 01.06.2010

Sprejeto / Accepted: 10.09.2010

Izvirni znanstveni članek

Original scientific paper

## Premočrtno odrezavanje kot metoda za določevanje lomnih značilnosti orientiranega lesnega tkiva

Miran MERHAR<sup>1</sup>, Bojan BUČAR<sup>2</sup>

### Izvleček

Prikazana je metoda določevanja kritične koncentracije napetosti na podlagi dolžine segmenta odrezka tipa I, nastalega v procesu premočrtnega ortogonalnega odrezavanja bukovine (*Fagus silvatica*) v smeri 90°-0°. Eksperimentalni rezi so bili narejeni na 10 mm debelih vzorcih pri cepilnem kotu 31° in 42°, debelina odrezka pa se je spreminjala v območju med 0,1 in 0,3 mm. Z metodo končnih elementov smo modelirali reprezentativni segment odrezka različnih dolžin in debelin. Spreminjali smo obremenitev segmenta ter vsakič izračunali koncentracijo napetosti na konici razpoke ter tlačno napetost v hipotetičnem odrezku.

Ob predpostavki, da se razpoka pri ločevanju tkiva širi zgolj v primeru, ko je koncentracija napetosti v njenem korenu kritična, ter da se tlačne napetosti v nastajajočem odrezku nenehno povečujejo vse do mejne vrednosti, lahko na osnovi znane dolžine reprezentativnega segmenta odrezka in tlačne trdnosti vzdolž poteka tkiva izračunamo kritično koncentracijo napetosti oziroma določimo lomno togost aktualnega materiala.

Razpoka napreduje namreč vse dokler tlačna napetost ne doseže porušne vrednosti, kar se zgodi na mestu loma odrezka. Kritične koncentracije napetosti, ki smo jih določili na osnovi dolžine reprezentativnega segmenta odrezka debeline 0,3 mm, se zelo dobro ujemajo z vrednostmi, dobljenimi s klasičnim frakturmim testom. Pri manjših debelinah odrezka prihaja do manjših odklonov, kar je najverjetneje posledica povečane asimetrije vzorca. Prikazano metodo lahko nedvomno označimo kot učinkovito in verodostojno, kar je tudi najbolj pomembno. Metoda je zelo enostavna in hitra, kajti lomne lastnosti aktualnega materiala je praktično moč določiti že z enim samim premočrtnim rezom. Treba je tudi poudariti, da je priprava vzorčnega materiala nezahtevna, kajti edino, na kar moramo paziti, je usmerjenost tkiva.

**Ključne besede:** premočrtno odrezavanje, odrezek, fraktura, fraktorni način, koncentracija napetosti

## *Oblique cutting as a method for determination of the fractural properties of oriented wood tissue*

### Abstract

The method for determination of critical stress intensity factor based on chip segment length of chip type-I originating from orthogonal oblique cutting of beech wood (*Fagus silvatica*) in the 90°-0° direction is shown. Experimental cuts on 10 mm thick specimen with rake angles 31° and 42° were made, and the chip thickness varied between 0,1 mm and 0,3 mm. Using the finite element method, we modelled a representative chip segment of varying length and thicknesses. We varied the load at the chip segment and calculated, for each case, stress intensity at the crack tip and compressive stress in hypothetical chip.

On presumption that the crack propagates during tissue separation only when the stress intensity at the crack tip equals the critical stress intensity and the compressive stress rises in chip formation process up to the limit strength, we can calculate the critical stress intensity factor by knowing the chip segment length and compressive strength in longitudinal direction.

Specifically, the crack propagates until the compressive stress reaches the strength, which occurs at the place of chip break. Critical stress intensity factor calculated from representative 0.3 mm thick chip segment length agrees well with values obtained with classical fracture tests. The results obtained from thinner chip segments deviates to a lesser extent, which is most probably a consequence of highly unsymmetrical specimen. The method has been undoubtedly shown as effective and reliable, which is the most important. The method is very simple and fast, enabling us to determine the fracture properties practically with a single oblique cut. It has to be emphasized, that the specimen preparation is also undemanding, for the only thing we have to pay attention to is the tissue orientation.

**Key words:** oblique cutting, chip, fracture, fracture type, stress intensity

<sup>1</sup> asist. M. M., UL, BF, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija, [Miran.Merhar@bf.uni-lj.si](mailto:Miran.Merhar@bf.uni-lj.si)

<sup>2</sup> prof. dr. B.B., UL, BF, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija, [Bojan.Bucar@bf.uni-lj.si](mailto:Bojan.Bucar@bf.uni-lj.si)

## 1 Uvod

### 1 Introduction

Odrezavanje je nedvomno najpomembnejši obdelovalni postopek za spreminjanje oblik obdelovancev s postopnim odzemanjem poljubnega materiala. Gre za proces bolj ali manj nadzorovanega ločevanja materiala s specifično oblikovanimi rezili. Oblika rezil je navadno zasnovana tako, da se ob stiku rezila z obdelovanim materialom v le tem pojavi izrazito lokalno povečanje koncentracije napetosti in posledično energijsko razmeroma nezahtevna lokalna porušitev. Pri orientiranem lesnem tkivu se v procesu mehanskega ločevanja tkiva pojavijo odrezki, ki pa jih je kljub razmeroma veliki variabilnosti relevantnih lastnosti materiala v dobršni meri le možno tipizirati. Le to je moč napraviti na osnovi morfoloških značilnosti formiranih odrezkov. Franz je med eksperimentalnim odrezavanjem s spremenljivimi relevantnimi parametri prišel do zaključka, da je možno vse odrezke, ki nastanejo pri odrezavanju vzdolž tkiva, razvrstiti v zgolj tri pomembno različne oblike. Odrezke je poimenoval kot odrezke tipa I, II ali III (KOCH 1985).

Odrezek tipa I je diskontinuiran in nastane kot posledica izmenjujočih se načinov porušitve lesnega tkiva, in sicer cepilne frakture ter loma odrezka zaradi upogiba. S stikom rezila in obdelovanega materiala se v le tem zaradi nastalih deformacij začne kopičiti elastična energija. Ko je slednja dovolj velika, se lahko zaradi morfološko primerne diskontinuitete v obdelovanem materialu, pri lesu je le teh zaradi specifične vlaknate strukture vedno dovolj, hipoma sprosti, kar se pokaže kot hipna, navadno usmerjena poklina oziroma fraktura v materialu. Obsežnost nastale frakture je dejansko odvisna zgolj od količine nakopičene energije. Nadaljnje prodiranje rezila povzroča širjenje razpoke oziroma cepljenje materiala vse do trenutka, ko postane koncentracija napetosti manjša od kritične oziroma ko tlačna napetost v upogibno obremenjenem odrezku doseže kritično oziroma porušno vrednost. Z napredovanjem razpoke se namreč tlačna napetost v upogibno obremenjenem odrezku nenehno povečuje.

Dolžina nastalega segmenta odrezka je odvisna izključno od lokalne frakturne togosti v konici razpoke ter od lokalnih tlačnih trdnosti materiala. Če navedene dejavnike poznamo, lahko na relativno preprost način določimo dolžino omenjenih segmentov oziroma njihov pričakovani razpon, če upoštevamo tudi variabilnost relevantnih dejavnikov.

Ker gre v primeru nastanka odrezka tipa I nedvomno za proces ločevanja strukture usmerjenega tkiva, ki je usodno povezan s signifikantno hipno frakturo, lahko predpostavimo tudi obratno, namreč, da je ob sicer znanih relevantnih dejavnikih, z razmeroma enostavnim rezalnim eksperimentom nedvomno možno določiti običajno kompleksne frakturne značilnosti aktualnega materiala. Dejansko je treba zgolj vzpostaviti razmere za nastanek

odrezka tipa I in določiti signifikantno dolžino segmenta nastalega odrezka.

S pojavom in značilnostmi fraktur so se v preteklosti ukvarjali številni avtorji (SIH / PARIS / IRWIN 1965, SAOUMA / SIKIOTIS 1986, STANZL-TSCHEGG / TAN / TSCHEGG 1995, SCHACHNER / REITERER / STANZL-TSCHEGG 2000, BANKS-SILLS et al. 2005). S klasičnimi testi so določevali frakturno togost simetrično obremenjenih vzorcev predpisanih oblik in dimenzij z umetno povzročeno iniciacijsko razpoko. V primeru odrezavanja gre za izrazito asimetrijo, kjer imamo na eni strani razmeroma tanek odrezek, na drugi pa v primerjavi z debelino odrezka skoraj polneskončni prostor, kar nedvomno vpliva tudi na vrednost frakturne togosti. V razpoložljivi literaturi, ki se ukvarja z nastankom odrezka oz. modeliranjem odrezavanja, še nismo zasledili raziskave, ki bi ponudila potrebna osnovna znanja, s katerimi bi bilo zgolj na podlagi dolžine segmenta specifično oblikovanega odrezka moč določiti frakturne značilnosti aktualnega materiala. Nekateri avtorji so pri izračunu modelirane sile sicer upoštevali energijo, potrebno za nastanek novih površin (WILLIAMS 1998, ATKINS 2003), vendar zgolj za neprekinjen odrezek. Triboulot (1983) je v svojem delu pri modeliranju nastanka odrezka na podlagi cepilnega in strižnega frakturnega načina frakturo sicer upošteval, vendar zgolj kot merilo za nastanek določenega tipa odrezka.

Namen našega dela je nedvomno potrditi postavljeno hipotezo o tem, da je možno enolično določiti frakturno togost obdelovanega materiala zgolj na podlagi dolžin segmentov tipičnega odrezka, ki nastane v procesu premočrtnega ortogonalnega odrezavanja vzdolž tkiva. Vzorcem bomo izmerili upogibno trdnost ter modelirali dolžine segmentov. Frakturno togost bomo določili z rezalnim eksperimentom, upoštevajoč pogoje, potrebne za lom odrezka in posledično dolžino segmentov. Dobljene vrednosti bomo primerjali z vrednostmi, določenimi s klasičnimi frakturnimi testi.

## 2 Material in metode

### 2 Materials and methods

Odrezavali smo bukovce vzorce (*Fagus sylvatica*) dolžine 130 mm in debeline 10 mm v smeri 90°-0°. Vzorec je bil brez vizualnih napak, vzdolžno orientiran s tangencialno teksturo, ravnovesno vlažnostjo 9,5 % in gostoto 678 kg/m<sup>3</sup>.

Vzorec smo pritrdili na vpenjalni sistem, ki je bil pritrdjen na 4-komponentni dinamometer Kistler tip 9272, s katerim smo merili sile v smeri in prečno na smer podajanja. Podatke smo zajemali z merilno kartico AT-MIO 16E1 ter programom LabView proizvajalca National Instrument.

Frekvenca vzorčenja je bila 10 kHz. Dinamometru smo izmerili lastne frekvence v smeri in pravokotno na smer podajanja, tako da smo ga s tolkalom vzbudili, da je lastno nihalo. Izmerjeni časovni posnetek lastnega nihanja smo nato s hitro Fourierjevo transformacijo pretvorili v frekvenčni spekter. Iz spektra smo odčitali lastno frekvenco dinamometra, ki je v smeri podajanja znašala okrog 650 Hz, pravokotno na smer podajanja pa 620 Hz.

Odrežavali smo z rezilom HSS z ostrinskim kotom  $30^\circ$  proizvajalca Leitz. Prsni koti so bili  $16^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $31^\circ$ ,  $42^\circ$  in  $54^\circ$ . Pri prsnem kotu  $16^\circ$  in  $22^\circ$  so nastali strižni kontinuirani odrezki tipa II, kot jih navaja Franz (KOCH 1985), pri drugih kotih pa so nastali diskontinuirani odrezki tipa I. Debelina odzema je bila od 0,1 mm do 0,3 mm z vmesnimi razlikami 0,05 mm.

Odrezkom tipa I smo izmerili dolžine segmentov odrezka pod lupo z 20x povečavo. Uporabili smo lupo Euromex tip SKO 37058. Povečava objektivna je bila 2x, na mesto okularja pa smo vstavili digitalno kamero proizvajalca Digital Eyepiece tip TCA-3.0. Kamera je imela že vgrajeno lupo z 10x povečavo, resolucija digitalnega senzorja pa je bila 3 milijone točk. Slike smo zajemali z osebnim računalnikom s programom TSView, ki nam je omogočil tudi merjenje razdalj na posnetih slikah. Povprečna dolžina zlomljenega segmenta odrezka je znašala od 0,3 mm pri debelini odrezka 0,1 mm do 1,6 mm pri debelini odrezka 0,3 mm.

Ker smo želeli, da je pogostnost oz. frekvenca lomljenja odrezka nižja od lastne frekvence dinamometra, smo hitrost rezila nastavili na 30 mm/s. Rezilo je bilo nameščeno na voziček z vodili, katerega podajanje smo izvedli s hidravličnim cilindrom. Hitrost podajanja smo nadaljevali z enosmerno dušenim ventilom z zvezno nastavitvijo dušenja pretoka hidravličnega medija.

S štiritočkovnim upogibom smo vzorcem dimenzije 100 mm x 10 mm x 5 mm v vzdolžni smeri določili modul elastičnosti  $E$  ter upogibno trdnost  $\sigma$ . Za določevanje modula elastičnosti smo vzorce obremenili do 40 % porušne sile, za določevanje trdnosti pa smo vzorce obremenili do porušitve. Porušno trdnost v vzdolžni smeri smo določili tudi s konzolno vpetim vzorcem, kjer je bila konzola debela 0,5 mm, široka 10 mm in dolga 16 mm.

Odrežavanemu vzorcu smo določili tudi kritično koncentracijo napetosti  $K_{IC}$  za frakturni način I. Vzorec je bil CT-oblike, dolžine 120 mm, višine 100 mm in debeline 10 mm. Dolžina razpoke je bila 55 mm. Vzorec je bil TL-usmeritve, kar pomeni, da smo ga obremenjevali v tangencialni smeri, razpoka pa je napredovala v vzdolžni smeri. Silo obremenjevanja smo merili z dinamometrom na trgalnem stroju, odpiranje ustja pa z namensko narejenim merilnikom iz jeklenih lističev, na katere smo namestili uporovne lističe. Iz maksimalne izmerjene sile smo s pomočjo  $J$  integrala izračunali kritično koncentracijo napetosti.

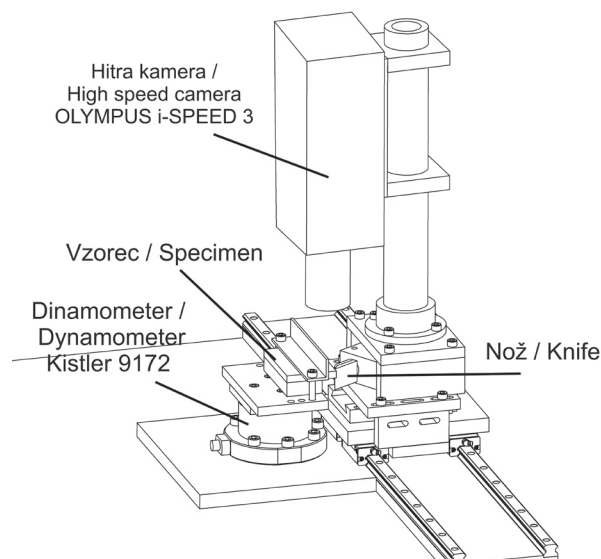
Z metodo končnih elementov s programom Ansys smo modelirali odrezke debeline od 0,15 mm do 0,3 mm z različnimi dolžinami od 0,4 mm do 2 mm. Odrezke smo postopno obremenjevali in vsakič izračunali koncentracijo napetosti  $K_I$  za frakturni način I na konici razpoke ter tlačno napetost  $\sigma$  na gornji strani odrezka. Iz izračunov smo dobili zvezo med silo obremenjevanja, koncentracijo napetosti na konici razpoke ter tlačno napetostjo na gornji strani odrezka za točno določeno debelino in dolžino segmenta odrezka.

Proces odrezavanja smo posneli tudi s hitro kamero Olympus I-SPEED 3. Hitrost snemanja je bila 2000 posnetkov na sekundo pri resoluciji 1280 x 1024 pik na palec. Kamero smo namestili na voziček, na katerem je bil tudi nož. Dobljeni posnetki so nam bili v pomoč pri razjasnitvi procesa nastanka odrezka tipa I.

### 3 Rezultati in diskusija

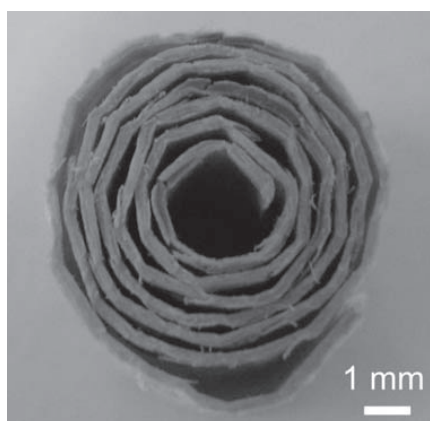
#### 3 Results and discussion

Na sliki 1 je prikazan eksperiment, na sliki 2 pa slika odrezka debeline 0,3 mm, nastalega pri odrezavanju s prsnim kotom  $31^\circ$ . Iz slike 2 so lepo razvidne lokacije loma odrezka in dolžine nastalih segmentov odrezka. Na sliki 3 so prikazane izmerjene dolžine oz. porazdelitev dolžin segmentov enega odrezka debeline 0,3 mm, nastalega pri odrezavanju s prsnim kotom  $31^\circ$ . Iz nje je razvidna velika variabilnost dolžin segmentov vse od 0,73 mm pa do skoraj 3 mm. Povprečna vrednost dolžine segmenta znaša 1,62 mm, standardni odklon pa 0,53 mm. Velikemu standardnemu odklonu je ustrezna tudi oblika porazdelitve, ki nima oblike normalne porazdelitve z vrhom okoli povprečne vrednosti, temveč ima v področju standardnega odklona skoraj vodoraven vrh.



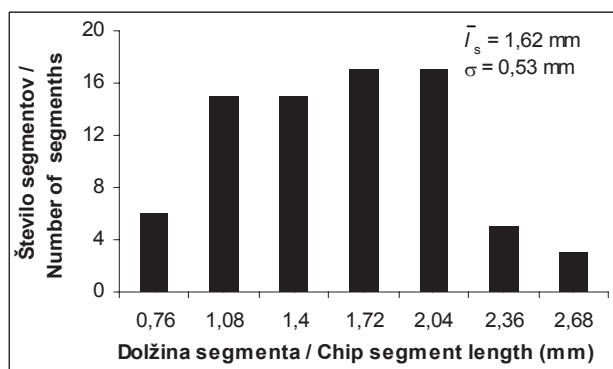
Slika 1: Eksperimentalni sistem

Fig. 1: Experimental system



Slika 2: Segmentiran odrezek debeline 0,3 mm, nastal pri prsnem kotu 31°

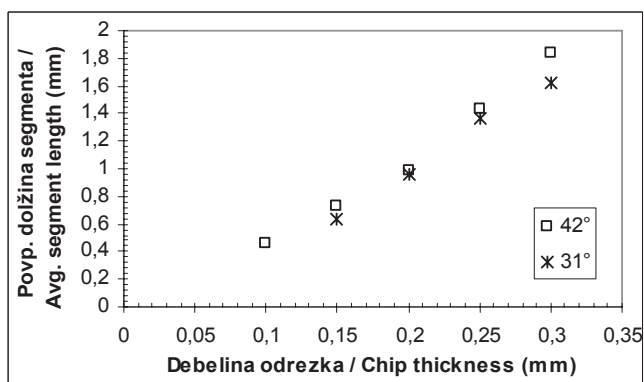
Fig. 2: Segmented chip; rake angle 31°; chip thickness 0.3 mm



Slika 3: Porazdelitev dolžine segmentov odrezka debeline 0,3 mm, nastalega pri cepilnem kotu 31°

Fig. 3: Distribution of chip segment length; chip thickness 0.3 mm; rake angle 31°

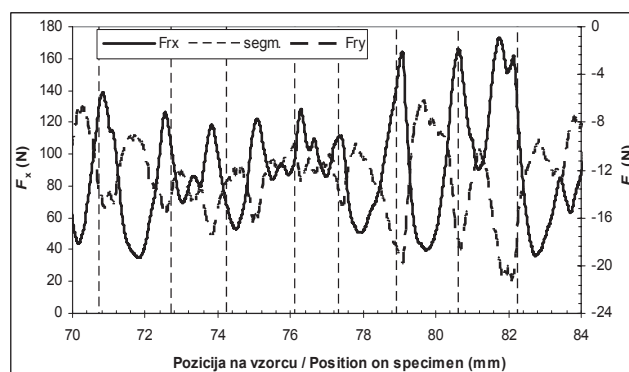
Povprečne dolžine segmentov odrezka tipa I za različne debeline odvzema in prsna kota 31° in 42° prikazuje slika 4. Iz nje je razvidna linearna odvisnost dolžine segmenta odrezka od debeline odvzema, medtem ko se povprečne vrednosti pri različnih prsnih kotih za iste debeline odvzema bistveno ne razlikujejo.



Slika 4: Povprečne dolžine segmentov različnih debelin odrezka za prsna kota 31° in 42°

Fig. 4: Average chip segment lengths for different chip thickness; rake angles 31° and 42°

Na sliki 5 so prikazane izmerjene sile v smeri in pravokotno na smer podajanja skupaj s položaji lomov odrezka. Iz slike je razvidno zelo dobro ujemanje med položajem loma odrezka in vrhom sile, ko rezilo prodre v še nerazcepljen del lesa. Ponekod so vidni manjši odkloni med vrhom sile in položajem loma odrezka, kar je posledica meritve lokacije loma odrezka s strani odrezka. Glede na to, da je bila debelina odrezka 0,3 mm, širina odrezka pa 10 mm, je lahko prišlo na strani odrezka, kjer smo z mikroskopom merili lokacijo loma, prej do loma kot na preostali širini odrezka ali pa celo kasneje. Tako smo lahko izmerili krajšo oz. daljšo dolžino segmenta, kot je bila njegova povprečna dolžina.



Slika 5: Potek rezalnih sil v smeri in pravokotno na smer podajanja ter lokacije lomov odrezka debeline 0,3 mm, odrezanega pri prsnem kotu 31°

Fig. 5: Forces in cutting direction and perpendicular to the cutting direction together with chip segment length; chip thickness 0.3 mm; rake angle 31°

Sile v smeri in pravokotno na smer podajanja glede na čas izrazito nihajo, kar je posledica izmenjujočega se delovanja frakture in loma odrezka zaradi upogiba. Ko pride rezilo v stik s še nerazcepljenim delom lesa, se konica rezila najprej vtiska v nerazcepljeni del lesa, v katerem se kopiči elastična energija. Ko je nakopičena energija dovolj velika in nastane najmanjša razpoka, se energija sprosti in tvori se odrezek tipa I, tako da razpoka hitro napreduje do neke ravnovesne dolžine. Tik preden nastane razpoka, so sile največje. Nato rezilo dalje dviguje odrezek, razpoka pa napreduje vse dokler je na konici razpoke koncentracija napetosti enaka kritični koncentraciji napetosti  $K_I = K_{IC}$  ter dokler je tlačna napetost na gornji strani odrezka manjša od porušne vrednosti  $\sigma < \sigma_{por}$ . Z večanjem razpoke se tlačna napetost na gornji strani odrezka povečuje. Ko doseže porušno vrednost, se odrezek zlomi in nastane segment določene dolžine. Tako je na kraju loma odrezka koncentracija napetosti na konici razpoke enaka kritični koncentraciji napetosti  $K_I = K_{IC}$ , tlačna napetost na gornji strani odrezka pa enaka porušni vrednosti  $\sigma = \sigma_{por}$ . V primeru, da poznamo tlačne trdnosti ter dolžine segmentov odrezka, lahko določimo kritični faktor koncentracije napetosti  $K_{IC}$  za frakturni način I.



Odrezavanemu vzorcu smo določili tudi modul elastičnosti  $E$  v vzdolžni smeri, tlačne trdnosti v vzdolžni smeri ter kritično koncentracijo napetosti  $K_{IC}$  za frakturni način I oz. cepilni način. V tabeli 1 so prikazani rezultati meritev. Povprečni modul elastičnosti  $E$  v vzdolžni smeri znaša 14500 MPa s standardnim odklonom 1415 MPa, tlačne trdnosti  $\sigma$ , dobljene s štiritočkovnim upogibom 150 MPa s standardnim odklonom 11 MPa, ter tlačne trdnosti konzolno vpetih vzorcev 185 MPa s standardnim odklonom 12 MPa. Razliko trdnosti med štiritočkovnim upogibom in konzolno vpetemu vzorcu pripisujemo temu, da je bil v primeru štiritočkovnega testa vzorec debelejši in je predstavljal povprečje materiala, v primeru konzole, kjer je bil vzorec debel samo 0,5 mm, pa smo naleteli na trdnější del materiala. Standard za določevanje upogibnih trdnosti predpisuje štiritočkovni upogib, da bi izognili vplivu striga, vendar pa konzolno vpetje v našem primeru ponazarja realnejši model.

V tabeli 1 so navedene tudi vrednosti za kritično koncentracijo napetosti. Povprečna vrednost znaša 0,63 MPa $\sqrt{m}$  s standardnim odklonom 0,09 MPa $\sqrt{m}$ . Za izračun kritične koncentracije napetosti  $K_{IC}$  za frakturni način I smo z metodo končnih elementov s programom Ansys modelirali modificirani CT-vzorec z dimenzijami, kot je bil pri meritvah. Modelirali smo ravninsko deformacijsko stanje z ortotropnimi lastnostmi lesa. Za vzdolžni modul elastičnosti  $E$  smo upoštevali izmerjenega, ki je znašal 14500 MPa, za druge smeri ter vrednosti za strižne module ter Poissonova razmerja pa smo podatke vzeli iz Kollmana in Cote (1984):

$E_t = 1140$  MPa,  $E_r = 2240$  MPa,  $\nu_t = 0,518$ ,  $\nu_r = 0,36$ ,  $\nu_{tr} = 0,45$ ,  $G_{tr} = 1055$  MPa,  $G_{tt} = 460$  MPa in  $G_{rr} = 1600$  MPa.

Vzorec smo obremenili z maksimalno izmerjeno silo, ki je ponazarjala silo, pri kateri se je vzorec frakturiral. Kritični faktor intenzitete napetosti  $K_{IC}$  smo izračunali s pomočjo Riceovega  $J$ -integrala (BANKS-SILLS et al. 2005).

$$J = \int_{\Gamma} (W_d dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

$\Gamma$  je pot integracije,  $W_d$  deformacijska energija na enoto volumna

$$W_d = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \quad (2)$$

$T$  vektor napetosti, ki deluje pravokotno na konturo  $\Gamma$ ,  $u$  pa vektor deformacij in  $ds$  diferencial poti  $\Gamma$ .

Če upoštevamo, da je  $J = G$ , kjer je  $G$  hitrost sproščanja deformacijske energije, ter da je površina razpoke

vzporedna z glavno osjo materiala, lahko uporabimo zvezo med  $G_I$  ter  $K_I$  (SIH / PARIS / IRWIN 1965)

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (3)$$

kjer je  $E'$  ekvivalentni modul elastičnosti

$$E' = \left[ \frac{b_{11}b_{22}}{2} \left( \sqrt{\frac{b_{22}}{b_{11}}} + \frac{2b_{12} + b_{66}}{2b_{11}} \right) \right]^{-1/2} \quad (4)$$

V primeru ravninskega deformacijskega stanja moramo upoštevati

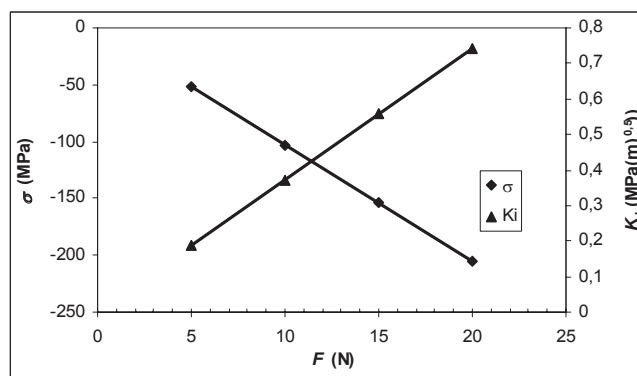
$$b_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{i3}a_{j3}}{a_{33}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

kjer so konstante  $a_{ij}$  podajnostni koeficienti materiala

$$a_{11} = \frac{1}{E_{11}}, a_2 = \frac{1}{E_{22}}, a_{12} = a_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}}, a_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (6)$$

Za izračun koncentracije napetosti na konici razpoke segmenta odrezka in tlačne napetosti na gornji strani odrezka smo odrezek ravno tako modelirali z metodo končnih elementov s programom Ansys, kjer smo ravno tako upoštevali ravninsko deformacijsko stanje z ortotropnimi lastnostmi lesa ter postopek izračuna faktorja intenzitete napetosti kot pri modificiranem CT-vzorcu.

Na sliki 6 sta prikazani izračunani odvisnosti koncentracije napetosti na konici razpoke in tlačne napetosti na gornji strani odrezka od sile obremenjevanja za segment odrezka dolžine 1,6 mm in debeline 0,3 mm. Iz tako dobljene zveze lahko izračunamo silo, ki je potrebna, da se na konici razpoke vzpostavi kritična koncentracija napetosti. Iz dobljene sile pa dalje izračunamo tlačno napetost zaradi upogiba na gornji strani odrezka.



Slika 6: Tlačna napetost  $\sigma$  in koncentracija napetosti  $K_I$  v odvisnosti od sile za modeliran odrezek debeline 0,3 mm in dolžine 1,6 mm

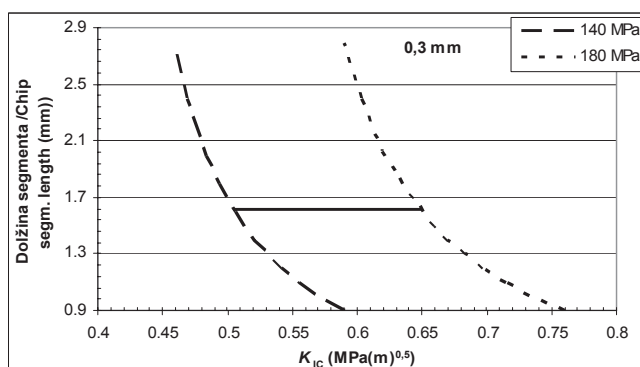
Fig. 6: Compressive stress  $\sigma$  and stress intensity factor as a function of chip load; chip thickness 0.3 mm; chip length 1.6 mm

Tabela 1: Izmerjene vrednosti odrezavanega vzorca

Table 1: Measured properties of specimen

	$K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$E$ (MPa)	$\sigma_{por}$ 4 točk (MPa)	$\sigma_{por}$ konz (MPa)
	0,52	13300	145	183
	0,73	13270	150,5	198
	0,68	15700	168,8	190
	0,56	16640	156,4	170
	0,66	13540	136	
		14874	149,7	
Povp. /Avg.	0,63	14554	151,07	185,25
Std. odk. /Std. dev	0,09	1415,38	11,04	11,87

Na sliki 7 so prikazane izračunane zveze med dolžino segmenta odrezka in koncentracijo napetosti pri konstantni tlačni napetosti za odrezek debeline 0,3 mm. Vodoravna črta ponazarja povprečno izmerjeno dolžino segmenta odrezka 1,62 mm, debeline 0,3 mm, nastalega pri odrezavanju s prsnim kotom 31°.



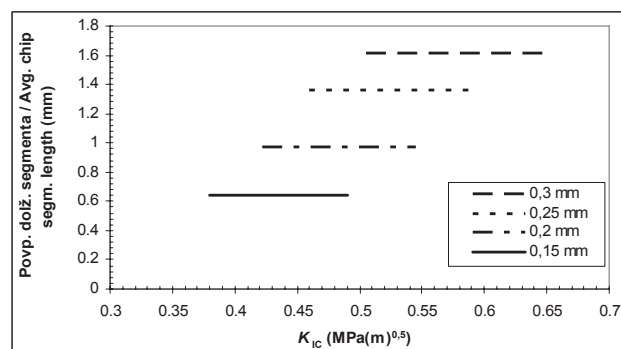
Slika 7: Dolžine segmentov v odvisnosti od kritične koncentracije napetosti  $K_{IC}$  za odrezek debeline 0,3 mm za območje tlačne trdnosti  $\sigma_{por}$  med 140 MPa in 180 MPa. Vodoravna črta ponazarja povprečno dolžino segmenta 1,6 mm.

Fig. 7: Relation between chip segment length and critical stress intensity factor for bending strength between 140 MPa and 180 MPa; chip thickness 0.3 mm. Horizontal line represents average 1,6 mm chip segment length.

V primeru povprečne dolžine segmenta 1,6 mm kritična koncentracija napetosti znaša od 0,5 MPa $\sqrt{m}$  pri tlačni trdnosti 140 MPa, pa vse do 0,65 MPa $\sqrt{m}$  pri tlačni trdnosti 180 MPa. Glede na to, da so izmerjene upogibne trdnosti s štiritočkovnim upogibom oz. konzolno vpetim vzorcem znašale 151 MPa oz. 185 MPa in glede na izmerjene kritične koncentracije napetosti modificiranega CT-vzorca, kjer so vrednosti znašale od 0,52 MPa $\sqrt{m}$  pa do 0,73 MPa $\sqrt{m}$ , so vrednosti za kritično koncentracijo napetosti, dobljene iz dolžine segmentov odrezka, vsekakor zadovoljive. V primeru, da upoštevamo tudi variabilnost

dolžin segmenta odrezka ter variabilnost upogibnih trdnosti, se območje izračunane kritične koncentracije napetosti še nekoliko poveča, vendar je še vedno v območju vrednosti, ki smo jih dobili pri statičnem testu za določevanje kritične koncentracije napetosti med 0,52 MPa $\sqrt{m}$  in 0,73 MPa $\sqrt{m}$ .

Na sliki 8 so prikazana izračunana območja za kritično koncentracijo napetosti za različne debeline odrezkov oz. njihove povprečne dolžine segmentov v območju tlačnih trdnosti med 140 MPa in 180 MPa. Iz slike je razvidno, da se izračunano območje kritične koncentracije napetosti z manjšanjem debeline odrezka in s tem povprečne dolžine segmenta znižuje. Razlog pripisujemo povečani asimetriji pri manjši debelini odrezka v primerjavi z večjo debelino. Glede na to, da je izračunano območje kritične koncentracije napetosti pri debelini odrezka 0,3 mm primerljivo z vrednostmi kritične koncentracije napetosti, določene s klasičnim frakturnim testom, vrednosti izračunane kritične koncentracije napetosti pri tanjših debelinah odrezkov pa nižje, je za določevanje kritične koncentracije napetosti vsekakor primernejši debelejši odrezek, saj se s tem izrazita asimetrija vzorca nekoliko zmanjša.



Slika 8: Izračunana območja kritične koncentracije napetosti  $K_{IC}$  pri različnih debelinah odrezkov oz. povprečnih dolžinah segmentov

Fig. 8: Calculated critical stress intensity factor  $K_{IC}$  ranges for different chip thicknesses

## 4 Zaključek

### 4 Conclusion

Z omenjenim delom smo prikazali način določevanja kritične koncentracije napetosti na podlagi dolžine segmenta odrezka tipa I po Franzu (KOCH 1985), ki nastane pri ortogonalnem premočrtnem odrezavanju. Pri tvorbi odrezka prihaja do izmenjujočega se načina porušitve lesnega tkiva, in sicer delovanja frakture in loma odrezka zaradi upogiba. Ko rezilo pride v stik z lesom, se konica rezila najprej vtiska v še nerazpokan del vzorca, v katerem se kopiči elastična energija. Ko je energija dovolj velika in nastane dovolj velika razpoka, le ta napreduje do določene dolžine. Z napredovanjem rezila se razpoka še dalje širi do lokacije, kjer je koncentracija napetosti  $K_I$  za frakturni način I enaka kritični koncentraciji napetosti  $K_{IC}$ , tlačna napetost na gornji strani odrezka pa enaka porušni vrednosti. Z upoštevanjem omenjenih relacij in poznavanjem dolžine segmenta smo določili kritično koncentracijo napetosti. Pri debelini odrezka 0,3 mm se območje izračunane kritične koncentracije napetosti zelo dobro ujema z vrednostmi, dobljenimi s klasičnim frakturnim testom, medtem ko se pri tanjših odrezkih območje nekoliko zniža. Razlog pripisujemo izrazitejši asimetriji pri tanjših debelinah odrezka.

Metoda se je izkazala za primerno za določevanje kritične koncentracije napetosti cepilnega načina, kjer lahko že z enim samim rezom premočrtnega ortogonalnega odrezavanja določimo povprečno kritično koncentracijo napetosti in njene variabilnost. Poudariti je treba, da je priprava vzorca enostavna in nezahtevna, saj ne potrebujemo vzorca predpisanih oblik in dimenzij kot pri klasičnih frakturnih testih. Tudi iniciacija razpoke, ki je pri klasičnih frakturnih testih zelo pomembna, pri naši metodi ni problematična, saj določamo kritično koncentracijo napetosti izključno iz dolžin segmentov odrezka, na kar pa iniciacija ne vpliva. Tudi izvedba eksperimenta je relativno enostavna v nasprotju s klasičnim frakturnim testom, kjer moramo poleg sile meriti tudi odpiranje ustja vzorca. Pozorni moramo biti edino, da je debelina odrezka čim večja, seveda v razumnih mejah, oz. okoli 0,3 mm, saj s tem zmanjšamo asimetrijo vzorca.

## 5 Summary

In the mechanical wood tissue splitting process, chips are made that can be standardized to a large extent despite the relatively large variability of relevant wood properties. This can be done based on chip morphological properties. Type-I chip is discontinuous one, made as a consequence of exchangeable manners of wood tissue break down, namely cleavage type fracture and chip breaks due to bending. When the blade comes in contact with machining material, the elastic energy accumulation begins as a consequence of machining material deformation. When

the accumulated energy is sufficient, it can be suddenly released if the morphological appropriate discontinuity in cutting material is present. The last condition is in the case of fibrous tissue like solid wood almost always met. The sudden energy release is reflected as a quick, usually directed fracture propagation in the material. The extent of newly formed fracture depends only on the amount of accumulated elastic energy. With further penetration of the blade, the crack propagates until the stress intensity factor at the crack tip equals the value of critical stress intensity factor, or the compressive stress in bended chip reaches critical stress, i.e. strength. Specifically, the compressive stress in the chip increases with chip free segment length.

The aim of our work is to unequivocally confirm the hypothesis that the critical stress intensity factor can be determined solely on chip segment length made by orthogonal oblique cutting along the tissue.

Experimental cuts on a 10 mm thick beech (*Fagus silvatica*) specimen with rake angles 31° and 42° were made, and the chip thickness varied between 0.1 mm and 0.3 mm. The average specimen moisture content was 9.5% and the density 678 kg/m<sup>3</sup>. Cutting tests were made along wood tissue in 90°-0° direction. High speed steel blade had a tool angle of 30°, while the rake angles were 16°, 22°, 31°, 42° and 54°. At the rake angles of 31°, 42° and 54°, the chips formed were discontinuous chips type I. The cutting speed was constant and amounted to 30 mm/s.

For all specimens, we determined the modulus of elasticity  $E$  and bending strength  $\sigma_u$  with 4 point bending test. The specimens were 100 mm long, 10 mm wide and 5 mm thick. To determine the bending strength, we made additional tests with the 16 mm long, 10 mm wide and 0.5 mm thick cantilever specimen. The critical stress intensity factor for fracture mode I was also determined. The specimen was loaded in tangential direction and crack propagated in longitudinal direction.

Using the finite element method, we modelled a representative chip segment of varying length and thickness. Varying the load at the chip segment, we calculated for each case the stress intensity factor at the crack tip and compressive stress in hypothetical chip.

The critical stress intensity factor obtained from the representative 0.3 mm thick chip segment length agrees well with values obtained from classical fracture tests. For 1.62 mm average chip segment length and bending strength ranged from 140 MPa to 180 MPa, the critical stress intensity factors amounted to a value between 0.5 MPa√m and 0.65 MPa√m, while the values obtained from classical fracture tests amounted to a value between 0.52 MPa√m and 0.73 MPa√m. Taking into account that the 0.3 mm thick chip segment lengths varied from 0.8 mm to almost 3 mm, the range of calculated critical stress intensity factors widens. In case of thinner chip segment lengths, the range of calculated critical stress intensity factors deviates in a smaller amount, which is most likely due to large specimen

asymmetry.

The method has been undoubtedly shown as effective and reliable, which is what matters most. The method is very simple and fast, enabling us to determine the fracture properties practically with a single oblique cut. The crack initiation, which is very important in classical fracture tests and is made artificially, is not problematic in the presented method. The critical stress intensity factor is determined solely on chip segment lengths, which are not influenced by crack initiation. It has to be emphasized, that the specimen preparation is also undemanding, for the only thing we have to pay attention to is the tissue orientation.

## 6 Viri

### 6 References

- ATKINS, A., G., 2003. Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems.- *International Journal of Mechanical Sciences*, 45: 373-396.
- BANKS-SILLS, L. / HERSHKOVITZ, I. / WAWRZYNEK, P., A. / ELIASI, R. / INGRAFFEA, A., R., 2005. Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic material: Part I- $z = 0$  is a symmetric plane.- *Engineering Fracture Mechanics*, 72 :2328-2358.
- KOCH, P., 1985. Utilization of hardwoods growing on southern pine sites. Agriculture handbook no. 605.- U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, 3710 s.
- KOLLMANN, F., F., P. / COTE, W., A., 1984. Principles of Wood Science and Technology, Volume I: Solid Wood.- Berlin, Springer-Verlag, 592 s.
- SAOUMA, V., E. / SIKIOTIS, E., S., 1986. Stress intensity factors in anisotropic bodies using singular isoparametric elements.- *Engineering Fracture Mechanics*, 25(1): 115-121.
- SCHACHNER, H. / REITERER, A. / STANZL-TSCHEGG, S., E., 2000. Orthotropic fracture toughness of wood.- *Journal of Material Science Letters*, 19: 1783-1785.
- SIH, G., C. / PARIS, P., C. / IRWIN, G., R., 1965. On cracks in rectilinearly anisotropic bodies.- *International Journal of Fracture Mechanics*, 1(3): 189-203.
- STANZL-TSCHEGG, S., E. / TAN, D., M. / TSCHEGG, E., K., 1995. New splitting method for wood fracture characterization.- *Wood Science and Technology*, 29: 31-50.
- TRIBOULOT, P. / ASANO, I. / OHTA, M., 1983. An application of fracture mechanics to the wood-cutting process.- *Mokuzai Gakkaishi*, 29(2): 111-117.
- WILLIAMS, J., G., 1998. Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests.- *Journal of Material Science*, 33: 5351-5357.